



УДК 621.771.2

DOI 10.17073/0368-0797-2021-1-14-20



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПАРАМЕТРОВ ПРУЖИНЕНИЯ ЛИСТА НА РОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ

Е. А. Максимов, Р. Л. Шаталов, В. Г. Шаламов

¹ ЗАО «Интрай» (Россия, 454090, Челябинск, ул. 3-го Интернационала, 113а)

² Московский политехнический университет (Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, 38)

³ Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

Аннотация. Показано, что практически все технологические процессы изготовления металлопродукции методами пластической деформации связаны с формированием в готовых изделиях самоуравновешенной системы остаточных напряжений. Уровень остаточных напряжений является во многих случаях важным параметром, определяющим качество изделий, полученных в результате пластического деформирования. Причины образования остаточных напряжений многообразны: неоднородность пластической деформации, температурного поля, фазовые превращения и др. По своей величине они могут превосходить напряжения от внешних нагрузок. В настоящее время к металлопродукции предъявляют дополнительные требования с целью создания машин и конструкций, работающих в условиях высоких нагрузок и скоростей, резких колебаний параметров внешней среды. Опыт эксплуатации конструкций в различных областях техники и результаты многочисленных экспериментов показывают, что остаточные напряжения существенно влияют на надежность и долговечность машин и механизмов. На основе теории о разгрузке А.А. Ильюшина получены аналитические зависимости для расчета эпюры изменения остаточных напряжений по толщине листа при изгибе под роликами правильной машины (РПМ), а также угла пружинения. Рассмотрено образование эпюры остаточных напряжений по толщине листа при правке для второго, третьего и последующих роликов РПМ. Установлено, что в результате принципа суперпозиции эпюра остаточных напряжений под вторым и третьим роликами складывается, образуя суммарную эпюру после второго и третьего роликов. Для четвертого, пятого, шестого и последующих роликов РПМ также происходит алгебраическое сложение эпюр остаточных напряжений. Показано, что для листа из стали 45 толщиной 10 мм, шириной 500 мм, $r/h = 200$ максимальные растягивающие остаточные напряжения 200 МПа наблюдаются на расстоянии $Z/h = 0,3$ от нейтральной линии по толщине листа. Сравнительный анализ показал, что для данного листа расхождение между опытными и расчетными значениями остаточных напряжений составляет 10 – 26 %, что позволяет рекомендовать методику расчета остаточных напряжений при правке листа на РПМ для оценки качества выправляемых листов.

Ключевые слова: роликовая правильная машина, листовой прокат, остаточные напряжения, параметры пружинения листа после правки

Для цитирования: Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Шаламов В.Г. Разработка методики расчета остаточных напряжений и параметров пружинения листа на роликовой правильной машине // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 1. С. 14–20. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-14-20>

CALCULATION OF RESIDUAL STRESSES AND PARAMETERS OF SHEET SPRINGING ON ROLLER LEVELER

E. A. Maksimov, R. L. Shatalov, V.G. Shalamov

¹ LLC "Intrai" (113a, 3-go Internatsionala str., Chelyabinsk 454090, Russian Federation)

² Moscow Polytechnic University (38, Bol'shaya Semenovskaya str., Moscow 107023, Russian Federation)

³ South Ural State University (76, Lenin ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

Abstract. Practically all technological processes of metal products manufacturing by plastic deformation methods are associated with the formation of a self-balanced system of residual stresses in finished products. Level of residual stresses is in many cases an important parameter that determines the quality of products obtained as a result of plastic deformation. Reasons for the formation of residual stresses are diverse (inhomogeneity of plastic deformation, temperature field, phase transformations, etc.), which in their magnitude can exceed stresses from external loads. Currently, additional requirements are imposed on metal products in order to create machines and structures operating under high loads and speeds, sharp fluctuations in the parameters of the external environment. The experience of operating structures in various fields of technology and the results of numerous experiments show that residual stresses significantly affect the reliability and durability of machines and mechanisms. Based on the A.A. Ilyushin theory of unloading, analytical dependences were obtained for calculating the diagram of the change in residual stresses across the sheet thickness during bending under the rollers of leveler, as well as the springing angle. Formation of a diagram of residual stresses along the sheet thickness during leveling for the second, third and subsequent rollers of the leveler is considered. It was found that as a result of the superposition principle, the residual stresses diagrams under the second and third rollers are added, forming a total diagram after the second and third rollers. For the fourth, fifth, sixth and subsequent leveler rollers, an algebraic addition of the residual stress diagrams also occurs. It is shown that for a 45 steel sheet with a thickness of 10 mm, a width of 500 mm, $r/h = 200$, the maximum tensile residual stresses of 200 MPa are observed at a distance of $Z/h = 0.3$ from the neutral line along the sheet thickness. And in this case the discrepancy between the experimental and calculated values of residual stresses is 10 – 26 %, which makes it possible to recommend a method for calculating the residual stresses when leveling a sheet on a roller leveler for estimation of its quality.

Keywords: roller leveler, rolled sheet, residual stresses, springing, sheet after leveling

For citation: Maksimov E.A., Shatalov R.L., Shalamov V.G. Calculation of residual stresses and parameters of sheet springing on roller leveler. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 1, pp. 14–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-14-20>

ВВЕДЕНИЕ

Практически все технологические процессы изготовления металлопродукции методами пластической деформации связаны с формированием в готовых изделиях самоуравновешенной системы остаточных напряжений. Уровень остаточных напряжений является во многих случаях важным параметром, определяющим качество изделий, полученных в результате пластического деформирования. Причины образования остаточных напряжений многообразны: неоднородность пластической деформации, температурного поля, фазовые превращения и др. По своей величине они могут превосходить напряжения от внешних нагрузок. В настоящее время к металлопродукции предъявляют дополнительные требования с целью создания машин и конструкций, работающих в условиях высоких нагрузок и скоростей, резких колебаний параметров внешней среды [1 – 5]. Опыт эксплуатации конструкций в различных областях техники и результаты многочисленных экспериментов показывают, что остаточные напряжения существенно влияют на надежность и долговечность машин и механизмов. Часто в листовом прокате могут образовываться внутренние напряжения. Образуются они при изготовлении деталей из-за неравномерной деформации, например, при прокатке, формовке, гибке и в местах сварки. Остаточные напряжения могут вызвать нарушение формы заготовки, из-за чего происходит быстрый износ или деформация детали [6 – 10].

При этом актуальной задачей является установление влияния технологии правки на уровень и характер распределения остаточных напряжений, которые могут достигать значительных величин вплоть до предела текучести и прочности материала, что часто приводит к разрушению конструкций при эксплуатации при достаточно низком уровне эксплуатационных нагрузок [11 – 15].

Остаточные растягивающие напряжения в листовом прокате приводят к резкому снижению предела выносливости, уменьшению числа циклов нагружения до момента зарождения усталостных трещин, уменьшению критического размера усталостной трещины и сокращению живучести деталей [16 – 20].

Известно, что правка листового проката осуществляется между двумя рядами роликов, при этом ролики одного ряда размещены в шахматном порядке по отношению к роликам другого ряда. При прохождении между роликами правильной машины (РПМ) лист получает многократные чередующиеся в противоположные стороны изгибы с напряжениями, превосходящими предел

текучести материала, при этом достигается выправление листа [7].

При прохождении листа через ролики РПМ будут поочередно растягиваться верхние и нижние зоны поперечного сечения прямолинейных участков и в результате эти участки получают удлинение. Как только длина прямолинейных и неплоскостных участков будет одинакова, лист выправляется и процесс правки прекращается [8, 9].

На практике режим правки листа существенно отличается от указанного в технологической инструкции из-за «пружинения» листа после снятия нагрузки. При этом в листе остаются остаточные напряжения, которые при дальнейшей обработке листа (формовка, гибка, резка, сварка) могут привести к нарушению формы, а также образованию микротрещин.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определим распределение остаточных напряжений по толщине листа и угол пружинения листа при изгибе под роликами РПМ.

Аналитические величины остаточных напряжений и угол упругого пружинения, проявляющиеся в изменении кривизны и угла изгиба, определялись на основании теоремы о разгрузке А.А. Ильюшина [5].

Согласно этой теореме связь между напряжениями и деформациями при разгрузке подчиняется закону Гука. Если лист при нагружении испытывает деформацию, то при разгрузке в нем возникнут остаточные напряжения, величина которых определяется как разность между напряжениями, действующими в нагруженном листе, и условными фиктивными напряжениями, которые возникли бы в листе при том же внешнем силовом воздействии, но при условии только упругого деформирования.

Условие равенства момента пластического изгиба листа и фиктивного момента упругих деформаций изгиба запишем в виде [10]

$$\sigma_Z \frac{bh^2}{6} = \sigma_S (W_S - 0,5W_y), \quad (1)$$

где W_S – момент сопротивления сечения листа при пластическом изгибе, $W_S = \frac{bh^2}{4}$; W_y – момент сопротивления

сечения листа при упругом изгибе, $W_y = \frac{bh^2}{6}$; σ_S – предел текучести материала листа без упрочнения; σ_Z – напряжения в поверхностных слоях листа (при $Z = h/2$) при фиктивном упругом изгибе (рис. 1); h – толщина листа; b – ширина листа.

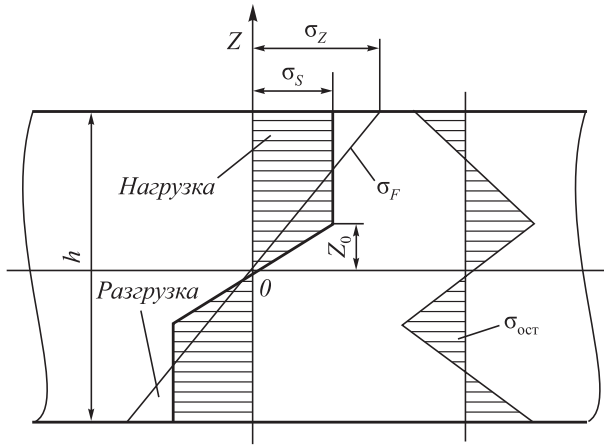


Рис. 1. Эпюры остаточных напряжений при правке листа на РПМ
Fig. 1. Diagrams of residual stresses at sheet leveling on a roller leveler

Решая уравнение (1) относительно σ_z , получим

$$\sigma_z = \sigma_s \left(\frac{W_s - 0,5W_y}{W_s} \right). \quad (2)$$

Распределение остаточных напряжений по толщине листа после разгрузки определим по формуле

$$\sigma_{ост} = \sigma_F - \sigma_s = \sigma_s \left[1 - \left(\frac{Z_0}{h} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где σ_F – фиктивные упругие напряжения.

Поскольку разгрузка происходит в условиях упругой деформации, то изменение кривизны листа, возникающее при разгрузке, можно определить по формуле

$$\frac{1}{\rho_{раз}} = \frac{M}{EI}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости материала листа; M – изгибающий момент, $M = 0,25bh^2\sigma_s$; I – момент инерции площади поперечного сечения листа относительно нейтральной поверхности, $I = \frac{bh^3}{12}$.

Подставляя значения изгибающего момента и момента инерции площади поперечного листа в формулу (4), получим

$$\frac{1}{\rho_{раз}} = \frac{3\sigma_s}{Eh}. \quad (5)$$

На основании теоремы о разгрузке А.А. Ильюшина [5], конечная кривизна нейтральной поверхности листа определяется как разность между кривизной под нагрузкой и изменением кривизны при разгрузке:

$$\frac{1}{\rho_{ост}} = \frac{1}{\rho_{ср}} - \frac{1}{\rho_{раз}} = \frac{1}{\rho_{ср}} - \frac{M}{EI}. \quad (6)$$

Решая уравнение (6) относительно остаточного радиуса кривизны $\rho_{ост}$, получим

$$\rho_{ост} = \frac{\rho_{ср}}{1 - \frac{M\rho_{ср}}{EI}}. \quad (7)$$

Зная остаточный радиус кривизны $\rho_{ост}$, можно определить остаточный угол $\alpha_{ост}$ изгиба, исходя из условия, что при разгрузке длина волокна на нейтральной поверхности заготовки не изменяется (рис. 2):

$$\alpha\rho_{ср} = \alpha_{ост}\rho_{ост}. \quad (8)$$

Разность между углом изгиба листа α и остаточным углом $\alpha_{ост}$ представляет собой угол пружинения:

$$\Delta\alpha = \gamma = \alpha - \alpha_{ост}. \quad (9)$$

Угол пружинения определим после подстановки остаточного угла $\alpha_{ост}$ (8) и остаточного радиуса кривизны $\rho_{ост}$ (7) в формулу (9):

$$\Delta\alpha = \gamma = \left(1 - \frac{\rho_{ср}}{\rho_{ост}} \right) \alpha = \frac{M\rho_{ср}}{EI} \alpha. \quad (10)$$

После несложных преобразований получим формулу для определения угла пружинения:

$$\Delta\alpha = \gamma = 3 \frac{\sigma_s}{E} \frac{\rho_{ср}}{h} \alpha = 3 \frac{\sigma_s}{E} \left(\frac{r}{h} + 0,5 \right) \alpha, \quad (11)$$

где r – радиус изгиба листа до пружинения.

Используя аналогичную методику, можно получить формулу для определения угла пружинения γ при изгибе с учетом влияния упрочнения металла, принимая, что кривая упрочнения аппроксимируется по линейной зависимости.

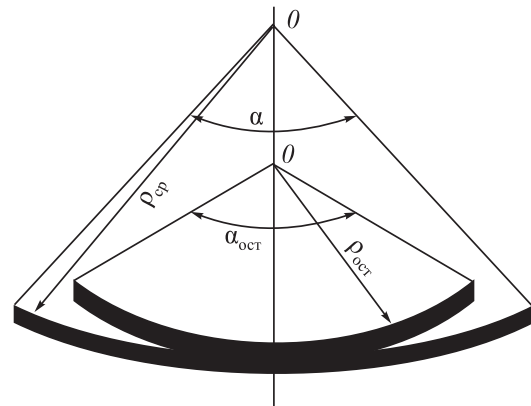


Рис. 2. Остаточный радиус кривизны $\rho_{ост}$ и остаточный угол $\alpha_{ост}$ при изгибе листа

Fig. 2. Residual radius of curvature $\rho_{ост}$ and residual angle $\alpha_{ост}$ at a sheet bend

Исходя из принятой эпюры распределения напряжений с учетом упрочнения, изгибающий момент запишем в виде

$$M = \frac{1}{4} \sigma_{s0} h + \frac{1,6 Ah}{(2r + h) h^2}, \quad (12)$$

где σ_{s0} – предел текучести листа в исходном состоянии; r – радиус изгиба листа до пружинения; A – модуль упрочнения материала листа при аппроксимации диаграммы напряжения – деформация линейной зависимостью.

Приравняв изгибающий момент (12) к фиктивному моменту упругой разгрузки, определяемому выражением

$$M = 1,6 \sigma_z h^2, \quad (13)$$

получим

$$\sigma_z = \frac{3}{2} \sigma_{s0} h + \frac{Ah}{2r + h}. \quad (14)$$

Далее, по аналогии определим угол пружинения с учетом упрочнения листа при изгибе:

$$\Delta \alpha = \gamma = \frac{1,5 \sigma_{s0} + Ah(2r + h)}{E} \left(\frac{r}{h} + 0,5 \right) \alpha. \quad (15)$$

При анализе формул (11) и (15) можно сделать следующие выводы:

- на величину угла пружинения существенное влияние оказывает отношение предела текучести к модулю упругости σ_z/E ;
- упрочнение повышает предел текучести, поэтому наклепанный металл пружинит больше, чем отожженный. При изгибе листы из высоко упрочняющихся металлов имеют больший угол пружинения, чем листы из менее упрочняющихся металлов;
- с увеличением угла изгиба листа α и относительного радиуса r/h угол пружинения возрастает.

Рассмотрим образование эпюры остаточных напряжений при правке листового проката на РПМ для второго и третьего роликов. На первом и последнем роликах деформации листа не происходит.

В результате упругопластического изгиба листа при нагрузке под вторым роликом РПМ на верхнем периферийном участке $0,5h \leq Z \leq Z_0$ возникают пластические напряжения растяжения, равные σ_s , на центральном участке листа $0 \leq Z \leq Z_0$ – упругие напряжения растяжения. На нижнем периферийном участке листа $-0,5h \leq Z \leq -Z_0$ возникают пластические напряжения сжатия σ_s , на центральном участке $-Z_0 \leq Z \leq 0$ – упругие напряжения сжатия.

После снятия нагрузки на эпюру упругопластического изгиба листа накладывается фиктивная эпюра упругих напряжений. В результате алгебраического сложения эпюры упругопластического изгиба листа и фиктивной эпюры упругих напряжений образуется эпюра остаточных напряжений, характеризующая максимальной величиной растягивающих напряжений (рис. 3, а).

В процессе правки при упругопластическом изгибе листа под третьим роликом РПМ наблюдается обратный перегиб листа.

Поскольку изгибы листа под вторым и третьим роликом РПМ противоположны, то эпюры на периферийном и центральном участках на третьем ролике изменяются на обратные по сравнению со вторым роликом.

На верхнем периферийном участке листа $0,5h \leq Z \leq Z_0$ возникают пластические напряжения сжатия, равные σ_s , на центральном участке листа $0 \leq Z \leq Z_0$ – упругие напряжения сжатия. На нижнем периферийном участке $-0,5h \leq Z \leq -Z_0$ возникают пластические напряжения растяжения σ_s , на центральном участке листа $-Z_0 \leq Z \leq 0$ – упругие напряжения растяжения.

Фиктивная эпюра упругих напряжений не изменяется. В результате алгебраического сложения эпюры упругопластического изгиба листа и фиктивной эпюры

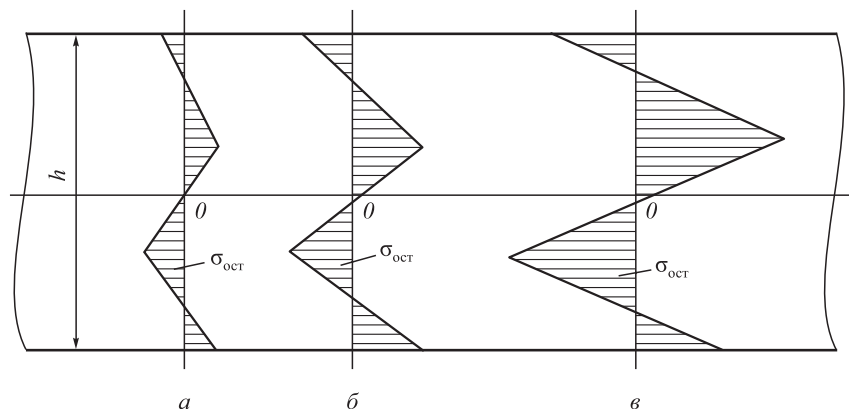


Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений:
 а – после второго ролика; б – после третьего ролика; в – суммарная после второго и третьего роликов

Fig. 3. Diagrams of residual stresses:
 а – after a roller No. 2, б – after a roller No. 3, в – total after rollers No. 2 and No. 3

упругих напряжений для третьего ролика образуется эпюра остаточных напряжений, аналогичная эпюре под вторым роликом (рис. 3, б).

Эпюры остаточных напряжений под вторым и третьим роликами имеют одинаковый закон изменения по толщине листа. Однако они отличаются различной величиной максимальных напряжений. В результате принципа суперпозиции эпюры остаточных напряжений под вторым и третьим роликами складываются, образуя суммарную эпюру после второго и третьего роликов (рис. 3, в).

Аналогично происходит алгебраическое сложение эпюр остаточных напряжений после четвертого, пятого, шестого и последующих роликов РПМ.

В работе [9] установлены следующие закономерности распределения остаточных напряжений при изгибе листа:

- с увеличением величины пластического изгиба минимальное и максимальное значение остаточных напряжений увеличивается;
- для неупрочняющихся материалов листа во всех случаях максимальное значение остаточных напряжений приближается к пределу текучести;
- при изгибе листов из неупрочняющихся материалов максимальные остаточные напряжения сосредотачиваются в сечении, близком к нейтральной поверхности.

Эпюры остаточных напряжений, представленные на рис. 3, хорошо согласуются с вышеприведенными выводами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО АНАЛИЗ

В настоящее время для практического определения остаточных напряжений используются экспериментальные методы. Механические методы, рассмотренные И.А. Биргером [10], основаны на изготовлении образцов, специальным способом вырезанных из дета-

ли с целью разгрузки, деформирования их до состояния с первоначальными размерами и определение с помощью тензодатчиков, наклеенных на поверхность образца, разгрузочных напряжений.

На практике широкое применение для определения остаточных напряжений получил рентгеновский метод [8].

В работе [4] для образцов из стали 45 и 12Х18Н10Т приведены опытные данные остаточных напряжений для различных соотношений r/h (рис. 4).

Результаты расчета изменения остаточных напряжений по толщине листа из стали 45 толщиной 10 мм, шириной 500 мм, $r/h = 200$ представлены в таблице.

Из таблицы следует, что максимальные растягивающие остаточные напряжения 200 МПа наблюдаются на расстоянии $Z/h = 0,3$ от нейтральной линии толщины листа.

Анализ данных, представленных в таблице, показал, что расхождение между опытными и расчетными значениями остаточных напряжений составляет 10 – 26 %, что позволяет рекомендовать методику расчета остаточных напряжений при правке листа на РПМ для оценки качества выправленных листов.

Выводы

На основе теории о разгрузке А.А. Ильющина получены аналитические зависимости для расчета эпюры изменения остаточных напряжений по толщине листа при изгибе под роликами РПМ, а также угла пружинения.

Установлено, что на величину угла пружинения оказывает влияние отношение предела текучести к модулю упругости σ_s/E , упрочнение повышает предел текучести, поэтому наклепанный металл пружинит больше, чем отожженный. При изгибе листы из высокопрочных металлов имеют больший угол пружинения, чем листы из менее упрочняющихся металлов, с увели-

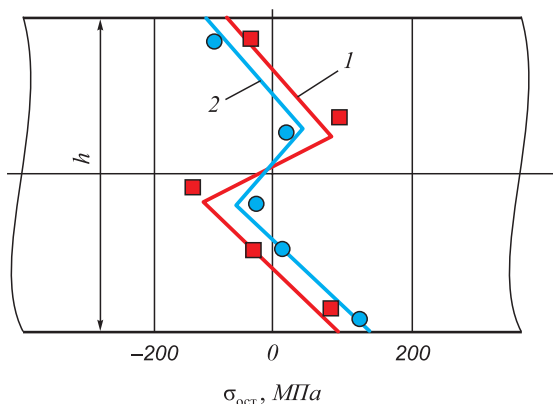


Рис. 4. Остаточные напряжения в листе после изгиба:
1 – сталь 45, $r/h = 200$; 2 – 12Х18 Н10Т, $r/h = 59,7$

Fig. 4. Residual stresses in sheet after a bend:
1 – 45 steel, $r/h = 200$; 2 – 12Kh18 N10T, $r/h = 59.7$

Результаты расчета изменения остаточных напряжений по толщине листа из стали 45 толщиной 10 мм, шириной 500 мм, $r/h = 200$

Results of calculation of residual stresses change along the thickness of a sheet from 45 steel with thickness of 10 mm, width of 500 mm, and $r/h = 200$

Z/h	0	0,1	0,15	0,20	0,25
$\sigma_{\text{ост опыт}}, \text{ МПа}$	0	–50	–100	150	170
$\sigma_{\text{ост рас}}, \text{ МПа}$	0	–37	–80	135	145
Расхождение, %	0	26,0	20,0	10,0	14,7
Z/h	0,3	0,35	0,40	0,45	0,5
$\sigma_{\text{ост экс}}, \text{ МПа}$	200	170	150	–100	–50
$\sigma_{\text{ост рас}}, \text{ МПа}$	175	145	135	–80	–37
Расхождение, %	12,5	14,7	10,0	20,0	26,0

чением угла изгиба листа α и относительного радиуса r/h угол пружинения возрастает.

Рассмотрено образование эпюры остаточных напряжений при правке листового проката для второго, третьего и последующих роликов РПМ. Установлено, что в результате принципа суперпозиции эпюры остаточных напряжений под вторым и третьим роликами складываются, образуя суммарную эпюру после второго и третьего роликов. Для четвертого, пятого, шестого и последующих роликов РПМ происходит алгебраическое сложение эпюр остаточных напряжений.

Показано, что для листа из стали 45 толщиной 10 мм, шириной 500 мм, $r/h = 200$ максимальные растягивающие остаточные напряжения 200 МПа наблюдаются на расстоянии $Z/h = 0,3$ от нейтральной линии по толщине листа.

Сравнительный анализ показал, что для данного листа расхождение между опытными и расчетными значениями остаточных напряжений составляет 10–26 %, что позволяет рекомендовать методику расчета остаточных напряжений при правке листа на РПМ для оценки качества выправляемых листов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Соколов И.А., Уральский В.А. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Metallurgy, 1981. 96 с.
2. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: УГТУ, 2002. 234 с.
3. Давиденков Н.Н. Рентгенография в применении к исследованию материалов. М.: ОНТИ, 1963. 248 с.
4. Богатов А.А., Тропотов А.В. О влиянии начальной поврежденности металла на длительную прочность и долговечность // Проблемы прочности. 1983. Вып. 11. С. 345–348.
5. Ильющин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Академия наук, 1963. 272 с.
6. Шелест А.Е., Юсупов В.С., Перкас М.М., Шефтель Е.Н., Просвирнин А.С., Акопьян К.Э. Разработка методики определения геометрических параметров металлических листов на роликовых машинах // Производство проката. 2016. № 7. С. 3–8.
7. Недорезов И.В. Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. Екатеринбург: Аква-пресс, 2003. 256 с. Семененко Ю.Л. Машины для правки проката. М.: ГНТИ, 1961. 205 с.
8. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. М.: Metallurgy, 1985. 376 с.
9. Kaiser R. Simulation of the roller straightening process with respect to residual stresses and curvature // Materials Science Forum. 2014. Vol. 768–769. P. 456–463. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.456>
10. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. Adjusting of roller levelers by finite element simulation including a closed-loop control // Advance Materials Research. 2014. Vol. 1018. P. 207–214. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.207>
11. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. The effect of the initial stress and strain state in sheet metals on the roller levelling process // Key Engineering Materials. 2015. Vol. 651–653. P. 1023–1028. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.207>
12. Grüber M., Hirt G. A strategy for the controlled setting of flatness and residual stress distribution in sheet metals via roller leveling // Procedia Engineering. 2017. Vol. 207. P. 1332–1337. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.892>
13. Trusov K.A., Mishnev P.A., Garber E.A., Bolobanova N.L., Nushtaev D.V., Ardatov K.V. Investigation of blank bow defect after roller leveller by finite element analysis // IOP Conference Series: Journal of Physics. 2018. Vol. 1063. No. 1. Article 012192. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1063/1/012192>
14. Trusov K.A., Mishnev P.A., Kopaev O.V., Nushtaev D.V. Numerical simulation of roller leveling using SIMULIA Abaqus // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 287. No. 1. Article 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/287/1/012014>
15. Behrens B.A., Krimm R. Controlled sheet metal straightening // TMS Annual Meeting. 2008. Vol. 3. P. 129–136.
16. Liu Z., Luo Y., Wang Y., Liao T. A new curvature analytical method in plate leveling process // ISIJ International. 2018. Vol. 58.
17. Sokolov I.A., Ural'skii V.A. *Residual Stresses and Quality of Metal Products*. Moscow: Metallurgiya, 1981, 96 p. (In Russ.).
18. Bogatov A.A. *Mechanical Properties and Models of Metal Destruction*. Yekaterinburg: UGTU, 2002, 234 p. (In Russ.).
19. Davidenkov N.N. *Radiography for Materials Research*. Moscow: ONTI, 1963, 248 p. (In Russ.).
20. Bogatov A.A., Tropotov A.V. Influence of initial metal damage on long-term strength and durability. *Problemy prochnosti*. 1983, no. 11, pp. 345–348. (In Russ.).
21. Il'yushin A.A. *Plastichnost'. Osnovy obshchei matematicheskoi teorii*. Moscow: Akademiya nauk, 1963, 272 p. (In Russ.).
22. Shelest A.E., Yusupov V.S., Perkas M.M., Sheftel' E.N., Prosvirnin A.S., Akopyan K.E. Development of methods for determining the geometric parameters of metal sheets on roller machines. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 7, pp. 3–8. (In Russ.).
23. Nedorezov I.V. *Modeling of Rolling on Roller Machines*. Yekaterinburg: Akva-press, 2003, 256 p. (In Russ.).
24. Semenenko Yu.L. *Machines for Rolled Products Leveling*. Moscow: GNTI, 1961, 205 p. (In Russ.).
25. Korolev A.A. *Design and Calculation of Machines and Mechanisms of Rolling Mills*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 376 p. (In Russ.).
26. Kaiser R. Simulation of the roller straightening process with respect to residual stresses and curvature. *Materials Science Forum*. 2014, vol. 768, pp. 456–463. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.456>
27. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. Adjusting of roller levelers by finite element simulation including a closed-loop control. *Advance Materials Research*. 2014, vol. 1018, pp. 207–214. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.207>
28. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. The effect of the initial stress and strain state in sheet metals on the roller leveling process. *Key Engineering Materials*. 2015, vol. 651, pp. 1023–1028. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.207>
29. Grüber M., Hirt G. A strategy for the controlled setting of flatness and residual stress distribution in sheet metals via roller levelling. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 207, pp. 1332–1337. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.892>
30. Trusov K.A., Mishnev P.A., Garber E.A., Bolobanova N.L., Nushtaev D.V., Ardatov K.V. Investigation of blank bow defect after roller leveller by finite element analysis. *IOP Conference Series: Journal of Physics*. 2018, vol. 1063, no. 1, article 012192. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1063/1/012192>
31. Trusov K.A., Mishnev P.A., Kopaev O.V., Nushtaev D.V. Numerical simulation of roller leveling using SIMULIA Abaqus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 287, no. 1, article 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/287/1/012014>
32. Behrens B.A., Krimm R. Controlled sheet metal straightening. *TMS Annual Meeting*. 2008, vol. 3, pp. 129–136.
33. Liu Z., Luo Y., Wang Y., Liao T. A new curvature analytical method in plate leveling process. *ISIJ International*. 2018, vol. 58,

- No. 6. P. 1094–1101. <https://doi.org/10.2355/isqinternational.ISIJINT-2017-738>
17. Silvestre E., Sáenz de Argandoña E., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll leveling process // *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 611–612. P. 1753–1762. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1753>
 18. Morris J.W., Hardy S.J., Thomas J.T. Some fundamental considerations for the control of residual flatness in tension leveling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 120. No. 1–3. P. 385–396. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01175-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01175-X)
 19. Liu Z., Wang Y., Yan X. A new model for the plate leveling process based on curvature integration method // *Int. Journal of Mechanical Sciences*. 2012. Vol. 54. No. 1. P. 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.10.011>
 - no. 6, pp. 1094–1101. <https://doi.org/10.2355/isqinternational.ISIJINT-2017-738>
 18. Silvestre E., Sáenz de Argandoña E., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll leveling process. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 611–612, pp. 1753–1762. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1753>
 19. Morris J.W., Hardy S.J., Thomas J.T. Some fundamental considerations for the control of residual flatness in tension leveling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol. 120, no. 1–3, pp. 385–396. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01175-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01175-X)
 20. Liu Z., Wang Y., Yan X. A new model for the plate leveling process based on curvature integration method. *Int. Journal of Mechanical Sciences*. 2012, vol. 54, no. 1, pp. 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.10.011>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Евгений Александрович Максимов, к.т.н., технолог, ЗАО «Интрай»

E-mail: maksimov50@mail.ru

Роман Львович Шаталов, д.т.н., профессор, Московский политехнический университет

E-mail: mmomd@mail.ru

Виктор Георгиевич Шаламов, д.т.н., профессор, Южно-Уральский государственный университет

Evgenii A. Maksimov, Cand. Sci. (Eng.), Technologist, LLC "Intrai"

E-mail: maksimov50@mail.ru

Roman L. Shatalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Moscow Polytechnic University

E-mail: mmomd@mail.ru

Viktor G. Shalamov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University

Поступила в редакцию 16.04.2020

После доработки 29.06.2020

Принята к публикации 25.12.2020

Received 16.04.2020

Revised 29.06.2020

Accepted 25.12.2020